

INTERAÇÃO SOLO-GEOSSINTÉTICO: PARÂMETROS DE INTERFACE EM SOLOS GRANULARES

Soil-Geosynthetic Interaction: Interface Parameters in Granular Soils

Micaela Oliveira, GeoXL Engineering & Innovative Solutions, Lda, Porto, Portugal, E-mail: mmoliveira@geoxl.com

Agostinho Mendonça, Soares da Costa SA, Porto, Portugal, E-mail: ammendonca@soaresdacosta.pt

M. Lurdes Lopes, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Secção de Materiais de Construção, Universidade do Porto, Porto, Portugal, E-mail: lcosta@fe.up.pt

RESUMO – O comportamento da interface solo/geossintético tem vindo a ser estudada, desde 1995, por um grupo de investigadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Para o efeito foram realizados ensaios de arranque, de corte direto e de corte em plano inclinado utilizando diferentes tipos de geossintéticos, nomeadamente geotêxteis, geogrelhas e geomembranas confinados em solos granulares. Será apresentado um tratamento global dos resultados obtidos com geogrelhas ensaiadas ao arranque, com o objetivo de obter correlações entre o coeficiente de resistência da interface, f , e as condições de aplicação de diferentes tipos de geogrelhas e solos. O tratamento estatístico das diferentes correlações permitiu obter uma equação geral entre o coeficiente de resistência da interface, f , e a tensão de confinamento, a granulometria e a compacidade do solo e a estrutura das geogrelhas, que é o objetivo principal do presente estudo.

SYNOPSIS – Intensive researches on soil/geosynthetic interface behaviour have been developed, since 1995, by a research group of the Faculty of Engineering of Porto University. In this research soil/geosynthetic interface behaviour was characterized by performing pullout, direct shear and inclined shear tests with different types of geosynthetics, namely, geotextiles, geogrids and geomembranes confined by granular soils. An overall treatment of the research collected data from geogrids pullout tests will be presented, in order to define correlations between the interface coefficient, f , and the application conditions of different types of geogrids and confining materials. By applying statistical analysis to the different correlations it was possible to obtain a general equation for the interface resistance coefficient, f , function of the soil compaction conditions, confining stress and geogrids structure, which is the corollary of the present research.

Palavras Chave – Interação solo granular-geogrelha, ensaios de arranque, coeficiente de resistência da interface.

1 – INTRODUÇÃO

O comportamento da interface solo-geossintético depende muito do movimento que se estabelece entre estes materiais, arranque ou corte direto, e de outros fatores tais como da tensão de confinamento ao nível do reforço, das dimensões das partículas de solo, da compacidade do solo e da estrutura do geossintético (Ferreira, 2010; Afonso, 2009; Mendonça, 2004; Costa e Lopes, 2001; Pinho-Lopes, 1998; Ladeira, 1995).

No Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto têm vindo a ser realizados, desde 1995, diversos estudos experimentais com vista à caracterização do comportamento da interface solo/geossintético através da realização de ensaios de arranque, de corte direto e de corte em plano inclinado. Para o efeito foram desenvolvidos diferentes equipamentos de ensaio, tendo por base as recomendações das normas europeias aplicáveis, nomeadamente as normas: NP EN 13738, NP EN ISO 12957-1 e NP EN ISO 12957-2 relativas ao ensaio de arranque, ao ensaio de corte direto e ao ensaio de corte em plano inclinado, respetivamente.

Foram ensaiados diferentes tipos de geossintéticos, nomeadamente geotêxteis, geogrelhas e geomembranas, sob diferentes condições de ensaio, com o objetivo de estudar a influência dos diferentes fatores e ainda determinar o coeficiente de resistência da interface, f , que é função do ângulo de atrito do solo e do ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

Este artigo será relativo ao comportamento ao arranque de geogrelhas envolvidas em solos granulares e ao tratamento estatístico de resultados obtidos com ensaios de arranque.

2 – ENSAIOS DE ARRANQUE

Os ensaios de arranque são utilizados para caracterizar a interação solo-geossintético quando o movimento relativo que é responsável pela mobilização da resistência nas interfaces corresponde ao arranque do reforço em relação ao solo. Os resultados obtidos com os ensaios de arranque incluem a variação da força de arranque com o deslocamento, os deslocamentos ao longo do reforço e os deslocamentos por deformação do reforço ao longo deste.

O coeficiente de resistência da interface, f , é obtido com base na tensão normal e na tensão tangencial ao nível da interface e no ângulo de atrito interno do solo (obtido em ensaios de corte direto).

No âmbito dos referidos estudos experimentais, foram ensaiadas ao arranque várias geogrelhas extrudidas uniaxiais e biaxiais embebidas em solos granulares (Mendonça, 2004; Pinho-Lopes, 1998; Ladeira, 1995). Todos os ensaios foram realizados no mesmo equipamento e seguindo a mesma metodologia de ensaio. Nos pontos seguintes será descrito o equipamento e a metodologia de ensaio utilizada e serão ainda apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados por Ladeira (1995) e Pinho-Lopes (1998), nos quais foram utilizadas quatro geogrelhas uniaxiais extrudidas e três tipos de solos granulares.

2.1 – Equipamento de Ensaio

Os ensaios de arranque foram realizados com o equipamento ilustrado na Figura 1, que é descrito de forma detalhada por Lopes e Ladeira (1996) e por Lopes e Lopes (1999). A caixa de corte possui pelo interior 1,53 m de comprimento, 1,00 m de largura e 0,80 m de altura. Uma vez que no ensaio podem surgir problemas de condições fronteira é colocada na caixa superior do equipamento uma placa de neoprene macio com 25 mm de espessura. A força de arranque, aplicada através de um sistema hidráulico, é avaliada através de uma célula de carga de tração colocada na pega que transmite a força ao geossintético. Durante a realização do ensaio, perpendicularmente ao geossintético, é aplicada uma tensão de confinamento através de uma placa atuada por dez pequenos cilindros, que é mantida constante ao longo do ensaio. Os deslocamentos ao longo de diferentes pontos do geossintético são medidos utilizando varetas extensíveis ligadas, numa extremidade, ao geossintético e na outra a potenciômetros lineares colocados no exterior da caixa. Os valores medidos são registados por um sistema automático de aquisição de dados.

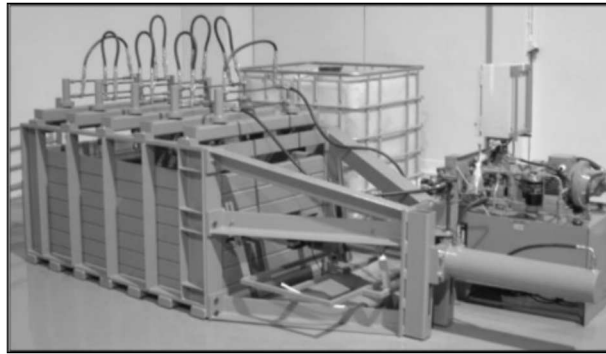


Fig. 1 – Ensaio de arranque. Equipamento.

2.2 – Metodologia de Ensaio

O solo é vertido para o interior da caixa de corte desde uma altura constante de cerca de 50 cm e colocado em camadas sucessivas de 0,15 m de espessura. Cada camada é nivelada e compactada para a densidade relativa requerida usando um martelo vibratório elétrico e o controlo da compactação é realizado através da utilização de um gamadensímetro. Quando o solo atinge os 0,30 m, o reforço é colocado sobre o solo compactado, é introduzido numa manga metálica e fixo na extremidade anterior à pega existente no exterior da caixa de corte. Em seguida são realizadas as ligações das varetas extensíveis ao reforço, numa extremidade, e aos potenciômetros lineares na outra. Finalmente, duas camadas com 0,15 m de espessura são niveladas e compactadas, resultando numa altura total de solo de 0,60 m com um geossintético de reforço no interior. Os ensaios são realizados a uma velocidade constante de 2 mm/min e a volume constante.

2.3 – Programa de Ensaios

No presente artigo serão considerados dois estudos experimentais, o estudo de Ladeira (1995) e o estudo de Pinho-Lopes (1998). O primeiro será designado por Programa de ensaios 1 (PG1) e o segundo por Programa de Ensaios 2 (PG2).

Os programas de ensaio envolveram o estudo de quatro geogrelhas uniaxiais em PEAD em três solos granulares diferentes. Todos os solos foram compactados para uma densidade relativa de 50 % e a tensão de confinamento aplicada ao nível do reforço variou entre 24,50 kPa e 87,80 kPa. As amostras de geossintético ensaiadas possuíam 0,96 m de comprimento e 0,33 m de largura. Os programas de ensaio podem ser consultados no Quadro 1. Cada ensaio foi repetido três vezes para determinação do valor médio e para assegurar a repetibilidade dos resultados dos ensaios.

Quadro 1 – Programa de ensaios (adaptado de Ladeira (1995) e Pinho-Lopes (1998)).

Estudo	Solo	Geogrelha	Peso volúmico (kN/m ³)	Pressão de confinamento (kPa)
PG 1	Solo 1.1	GGunx1.1	17,50	26,00
		GGunx1.1	17,50	46,70
		GGunx1.1	17,50	68,50
		GGunx1.1	17,50	87,80
PG 2	Solo 1.2	GGunx2.2	16,45	24,50
		GGunx1.2	16,45	38,00
		GGunx2.2	16,45	38,00
	Solo 2.2	GGunx3.2	16,45	38,00
		GGunx1.2	17,15	38,00
		GGunx2.2	17,15	38,00
		GGunx3.2	17,15	38,00

As propriedades físicas dos solos e das geogrelhas são apresentadas nos Quadros 2 e 3, respetivamente. A Figura 2 ilustra a geometria das geogrelhas extrudidas uniaxiais que foram ensaiadas.

Quadro 2 - Características dos solos (adaptado de Ladeira (1995) e Pinho-Lopes (1998)).

Estudo	Solo	D _{min} (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D _{max} (mm)	C _u	C _c	g _{limin} (kN/m ³)	g _{limax} (kN/m ³)	g (I _D = 55%)	f (°)
PG1	Solo 1.1	0,074	0,350	0,62	1,20	1,70	9,51	4,85	0,65	16,10	18,90	17,50	35,20 (s=46,7kPa)
PG2	Solo 1.2	0,074	0,260	0,32	0,43	0,50	2,00	1,92	0,79	15,00	17,90	16,45	35,70 (s=38,0kPa)
	Solo 2.2	0,074	0,440	0,90	1,30	1,60	9,54	3,64	1,15	15,60	18,70	17,15	44,20 (s=38,0kPa)

Quadro 3 - Propriedades físicas das geogrelhas (adaptado de Ladeira (1995) e Pinho-Lopes (1998)).

Estudo	Geogrelha	A _L (mm)	A _T (mm)	B _{WT} (mm)	F _{WL} (mm)	t _B (mm)	t _F (mm)	Força de tração máxima (kN/m)	Extensão sob força máxima (%)
PG 1	GGunx1.1	156,00	16,00	16,00	6,00	2,5 - 2,7	0,95	55,00	13,00
PG 2	GGunx1.2	160,00	16,00	16,00	6,00	2,5 - 2,7	0,90	55,00	11,50
	GGunx2.2	235,00	16,00	16,00	6,00	3,4 - 3,7	1,30	80,00	11,50
	GGunx3.2	235,00	16,00	16,00	6,00	5,5 - 5,9	2,00	120,00	11,50

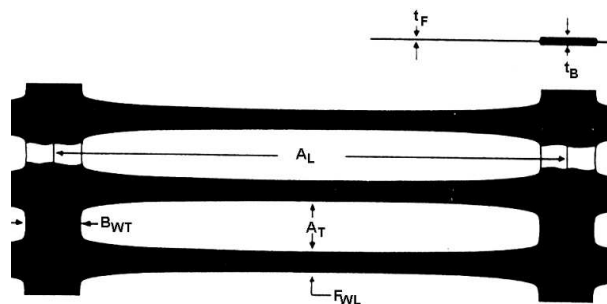


Fig. 2 – Geometria das geogrelhas uniaxiais.

2.4 – Resultados dos Ensaaios

As Figuras 3 e 4 mostram os resultados obtidos com os ensaios de arranque: a variação da força de arranque mobilizada com o deslocamento frontal (Figura 3); os deslocamentos totais ao longo do geossintético (Figura 4a) e os deslocamentos por deformação do geossintético ao longo do seu comprimento (Figura 4b). Ambos os deslocamentos são geralmente medidos para a força máxima de arranque.

Os deslocamentos por deformação do geossintético ao longo deste fornecem informações sobre o modo como se dá a transferência de tensões do solo para o geossintético de reforço e, desta forma, sobre a mobilização das tensões de corte na interface solo-reforço.

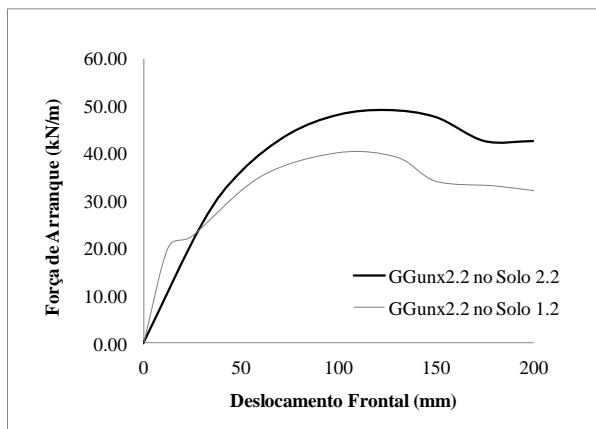
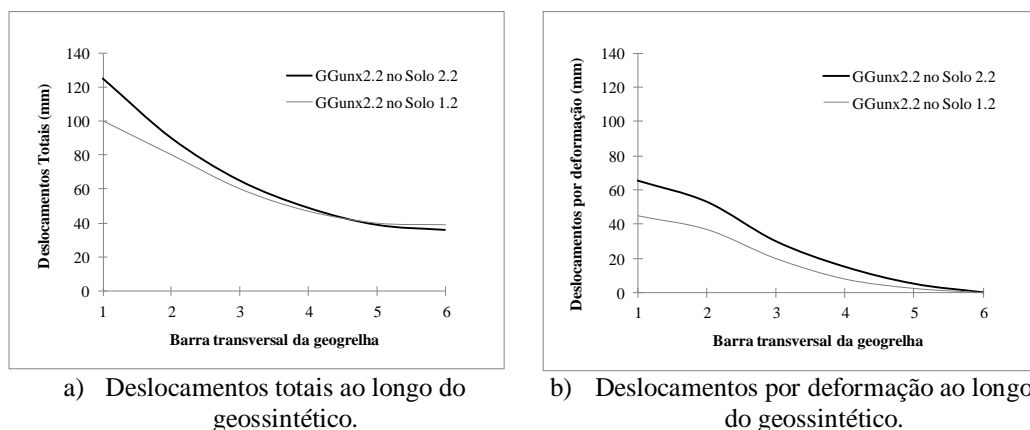


Fig. 3 – Resultados dos Ensaios de Arranque do PG2. Geogrelhas GGUnx2.2 embebidas no Solo 1.2 e no Solo 2.2 (Pinho-Lopes, 1998).



a) Deslocamentos totais ao longo do geossintético.

b) Deslocamentos por deformação ao longo do geossintético.

Fig.4 – Resultados dos Ensaios de Arranque do PG2. Geogrelhas GGUnx2.2 embebidas no Solo 1.2 e no Solo 2.2 (Pinho-Lopes, 1998).

Atendendo à tensão vertical de confinamento e à tensão de corte atuantes ao nível da interface e ao ângulo de atrito interno do solo, o coeficiente de resistência da interface, f , pode ser obtido por aplicação da Equação 1. Em cada ensaio, a tensão de corte é obtida para a força de arranque máxima registada.

$$f = \frac{\tau}{s'_n \tan f'} \quad (1)$$

τ - Tensão de corte (kPa);

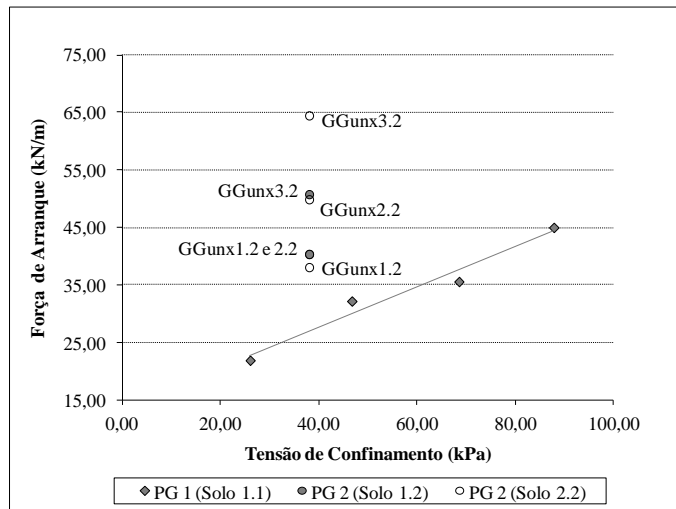
s'_n - Tensão vertical/ normal (kPa);

f' - Ângulo de atrito interno do solo (°).

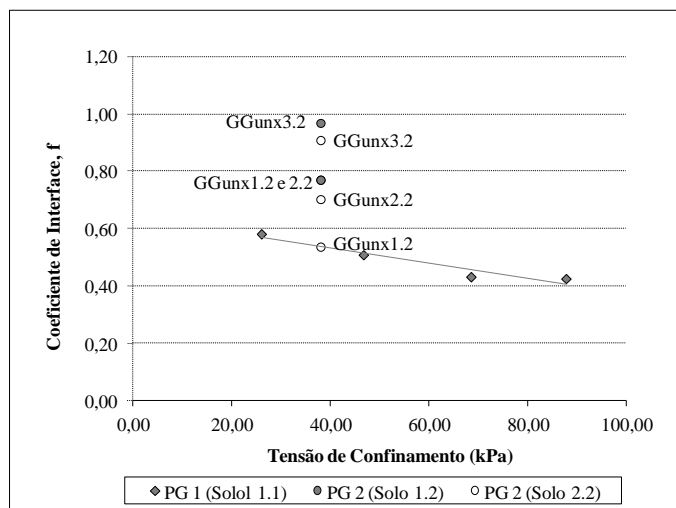
3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os estudos realizados por Ladeira (1995) e Pinho-Lopes (1998) permitiram avaliar a influência da granulometria e da compactidade do solo, da estrutura do geossintético e da tensão de confinamento no comportamento ao arranque das geogrelhas e permitiram tirar as seguintes conclusões principais:

- A granulometria do solo é um fator que influencia bastante o comportamento da interface solo/geogrelha;
- As dimensões relativas entre as dimensões das partículas do solo e as dimensões das aberturas e da espessura das barras transversais das geogrelhas determinam a resistência ao corte da interface solo-geogrelha;
- Quando o solo possui uma percentagem significativa de partículas com dimensões ligeiramente superiores à da espessura das barras transversais das geogrelhas, mas com dimensões inferiores às das suas aberturas, a resistência ao corte solo-geogrelha aumenta e o coeficiente de interface, f , diminui, tal como se pode observar nas Figuras 5a) e 5b) para os Ensaios PG2. Com as geogrelhas GGunx2.2 e GGunx3.2 a força de arranque máxima foi obtida com o solo 2.2, uma vez que solos com dimensões de partículas muito inferiores às dimensões das geogrelhas, como o solo 1.2, penetram melhor nas aberturas das geogrelhas mas são menos eficazes na mobilização do impulso passivo nas suas barras;
- Solos com uma percentagem significativa de partículas com dimensões superiores à das aberturas das geogrelhas podem conduzir a um pior comportamento, uma vez que as partículas ao não penetrarem nas aberturas das geogrelhas condicionam a mobilização do atrito na interface entre os dois materiais apenas através dos pontos de contacto das partículas de solo com a superfície lateral do reforço;
- Para uma determinada geogrelha, confinada num determinado solo, um aumento da tensão de confinamento conduz a um aumento da resistência ao corte e a uma diminuição do coeficiente de interface, tal com representado nas Figuras 5a) e 5b) (Ensaios do PG1);
- Em determinados casos, a resistência ao arranque é superior à resistência à tração das geogrelhas e a geogrelha rompe por falta de resistência à tração e não por falta de aderência, tal como aconteceu com a geogrelha GGunx1.2 no PG1, com a qual se obteve uma resistência ao corte superior com o solo 1.2 e não com o solo 2.2, como seria previsível à partida (Figura 5a).



a) Força de arranque versus Tensão de confinamento.



b) Coeficiente de resistência da interface, f .

Fig. 5 – Resultados dos Ensaios de Arranque dos PG1 e PG2.

4 – PARÂMETROS DE INTERFACE

O tratamento global de toda a informação recolhida com as campanhas experimentais que foram realizadas permitiu definir correlações entre o coeficiente de interface, f , e os diferentes parâmetros associados ao tipo de geogrelha e de solo. Através de uma análise estatística das diferentes correlações foi possível obter uma equação geral entre o coeficiente de resistência da

interface, f , e a tensão de confinamento, a granulometria e compacidade do solo e a estrutura das geogrelhas (Equação 2).

$$f = 112.584t_B - 0.004\sigma_n - 0.00352p_{2mm} - 0.010\gamma \quad (2)$$

t_B - Espessura das barras das geogrelhas (m);

σ_n - Tensão normal de confinamento (kPa);

p_{2mm} - Partículas com dimensões inferiores a 2mm (%);

γ - Peso volúmico do solo (kN/m³).

Nas figuras seguintes representam-se os principais resultados obtidos com os ensaios de arranque realizados com geogrelhas uniaxiais confinadas em solos granulares com diferentes granulometrias e compacidades e sob diferentes tensões de confinamento. A Figura 6 mostra a variação do coeficiente de interface, f , com a tensão de confinamento e as Figuras 7 e 8 a influência da compacidade e da granulometria do solo, respetivamente. O parâmetro granulometria do solo é traduzido pela percentagem de partículas do solo com dimensão inferior a 2 mm. Nas referidas figuras são ainda representados resultados estimados por utilização da Equação 2 e que se aproximam dos resultados obtidos pela via experimental.

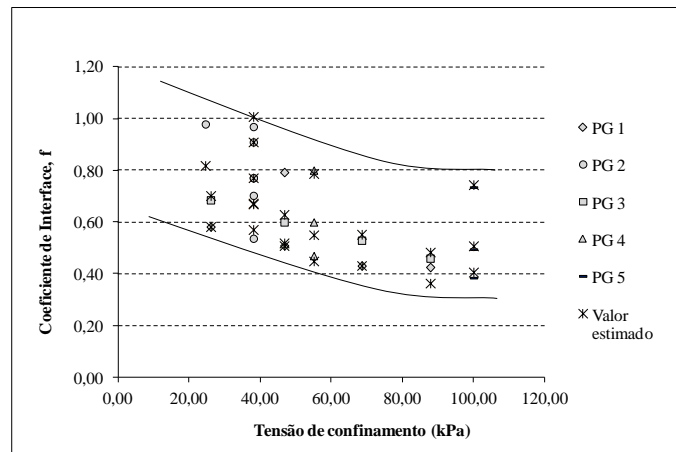


Fig. 6 – Coeficiente de resistência da interface versus Tensão de confinamento.

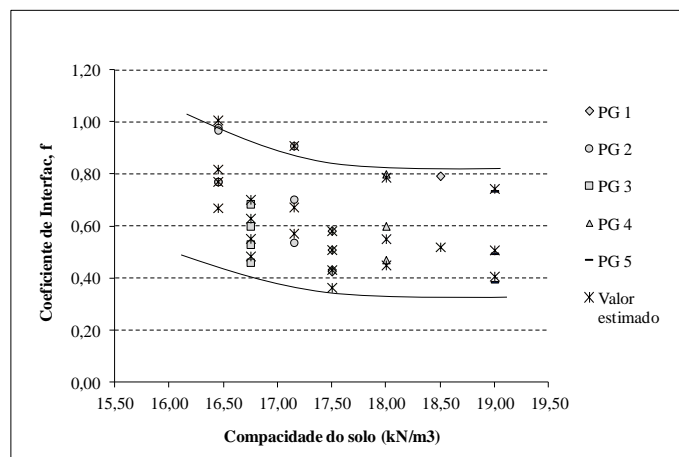


Fig. 7 – Coeficiente de resistência da interface versus Compacidade do solo.

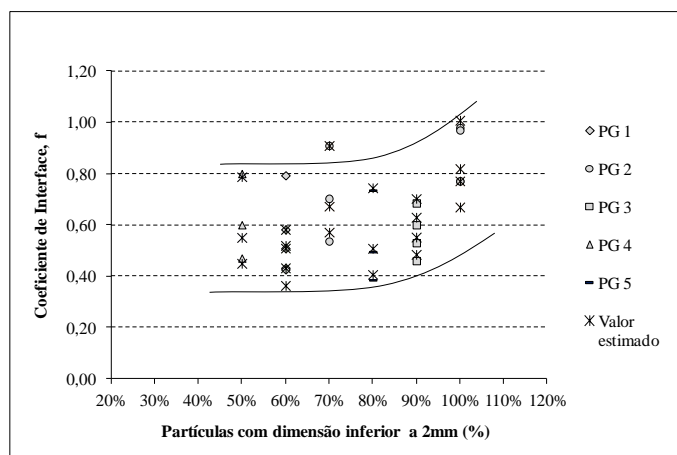


Fig. 8 – Coeficiente de resistência da interface versus Granulometria do solo.

Os resultados apresentados nas Figuras 6 a 8 validam as principais conclusões referidas no ponto 3, nomeadamente:

- O coeficiente de interface diminui com o aumento da tensão normal de confinamento, assumindo valores entre 0,60 e 1,00 para uma tensão de 20 kPa e entre 0,40 e 0,80 para tensões de 100 kPa;
- O coeficiente de interface diminui com o aumento da compacidade do solo, assumindo valores entre 0,50 e 1,00 para pesos volúmicos do solo da ordem dos 16,50 kN/m³ e entre 0,40 e 0,80 para pesos volúmicos superiores a 17,50 kN/m³;
- O coeficiente de interface varia entre 0,40 e 0,80 em solos que possuem 50 % de partículas com dimensão inferior a 2 mm, e entre 0,60 e 1,00 em solos finos cujas partículas são todas inferiores a 2 mm.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados nos últimos 18 anos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto permitiram sistematizar a influência dos principais parâmetros que controlam o comportamento ao arranque das interfaces solo granular/geossintético.

Com o tratamento global dos resultados obtidos em ensaios ao arranque com geogrelhas, foi possível definir correlações entre o coeficiente de interface, f , e a tensão de confinamento, a granulometria e compactidade do solo e a estrutura das geogrelhas. Uma análise estatística das diferentes correlações permitiu obter uma equação geral de definição do coeficiente de interface, f , em função dos referidos parâmetros.

O estudo realizado permitiu verificar uma boa aproximação entre os valores estimados com a expressão geral obtida e aqueles que foram obtidos em estudos experimentais.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, M.R. (2009). *Ensaio de Corte Directo na Caracterização da Interface Solo-Geossintético. Efeito da Variação da Tensão Normal*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 62p.
- Costa e Lopes, C.P.F. (2001). *Estudo da Interação Solo-Geossintético Através de Ensaio de Corte em Plano Inclinado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 194p.
- Ferreira, F.B. (2010). *Comportamento das Interfaces Solo-Geossintético*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 116p.
- Ladeira, M.A. (1995). *Estudo dos Fenómenos de Interação Solo-Geossintético através de Ensaio de Arranque*. Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 196p.
- Lopes, M.L. e Ladeira, M. (1996). *Role of the Specimen Geometry, Soil Height and Sleeve Length on the Pull-Out Behaviour of Geogrids*. Geosynthetics international, Vol. 3, nº 6, pp. 701-719.
- Lopes, M.J e Lopes, M.L.. (1999). *Soil-Geosynthetic Interaction - Influence of Soil Particle Size and Geosynthetic Structure*. Geosynthetics International, Vol. 6, nº 4, pp. 261-282.
- Mendonça, A. (2004). *Estudo do Comportamento de Estruturas Reforçadas com Geogrelhas*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 348p.
- NP EN 13738 (2007). *Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência ao arranque no solo*. IPQ
- NP EN ISO 12957-1 (2007). *Geossintéticos. Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de corte directo*. IPQ
- NP EN ISO 12957-2 (2005). *Geossintéticos. Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio em plano inclinado*. IPQ
- Pinho-Lopes, M. (1998). *Estudo da Influência da Granulometria do Solo e da Estrutura do reforço nos Mecanismos de Interação Solo-Geossintético*. Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 197p.